

ИФМ
УрО РАН

И. Г. Кулеев
И. И. Кулеев

**РОЛЬ КВАЗИПОПЕРЕЧНЫХ ФОНОНОВ
И УПРУГОЙ АНИЗОТРОПИИ
В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ
И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИИ ЩЕЛОЧНЫХ
И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛАХ**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ
ИМЕНИ М. Н. МИХЕЕВА

И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев

**РОЛЬ КВАЗИПОПЕРЕЧНЫХ ФОНОНОВ
И УПРУГОЙ АНИЗОТРОПИИ
В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭФФЕКТАХ
И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИИ
ЩЕЛОЧНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛАХ**

Монография

**ЕКАТЕРИНБУРГ
2023**

УДК 537.31 537.32
ББК 22.37
К 90

Рекомендовано к изданию ученым советом
Института физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук

Кулеев Игорь Гайнитдинович, Кулеев Иван Игоревич
Роль квазипоперечных фононов и упругой анизотропии в термоэлектрических эффектах и электросопротивлении щелочных и благородных металлах. / И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев.— Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2023, 204 с.
ISBN 978-5-8295-0882-1

Монография посвящена исследованию физических процессов, определяющих электронный транспорт в объемных и наноразмерных монокристаллических образцах кубической симметрии. В основу монографии положен цикл работ, выполненных авторами за последние пять лет. Основное внимание уделено исследованию влияния анизотропии упругой энергии и фокусировки фононов на электрон-фононную релаксацию и явления электронного переноса в щелочных и благородных металлах и наноструктурах на их основе. Проанализирована роль квазипродольных и квазипоперечных фононов, в электросопротивлении и термоэдс увлечения щелочных и благородных металлов. Определены константы связи электронов со сдвиговыми волнами в кристаллах калия и благородных металлах. Исследованы их вклады в электросопротивление и термоэдс увлечения в объемных материалах и наноструктурах. Показано, что сдвиговые волны вносят существенный вклад в термоэдс увлечения и электросопротивление этих металлов. При температурах значительно ниже температуры Дебая, их вклад превышает 90% электросопротивления кристаллов Au, Ag и Cu, а в кристаллах калия он более, чем в 4 раза превышает вклад продольных фононов. Проанализировано влияние фокусировки на распространение фононов и термоэдс электрон-фононного увлечения в монокристаллических пленках, нанопластинах и нанопроводах на основе кристаллов калия. Исследованы механизмы релаксации импульса электронов и фононов, приводящие к зависимостям кинетических эффектов в наноструктурах от температуры, геометрических параметров и направлений теплового потока. Для нанопроводов определены направления, а для монокристаллических пленок и пластин - ориентации плоскостей и направления потока тепла, обеспечивающие максимальные и минимальные значения термоэдс увлечения.

Монография адресована научным работникам в области физики конденсированного состояния, а также преподавателям, аспирантам и студентам физических и технических вузов.

УДК 537.31 537.32
ББК 22.37

Рецензенты

Доктор физико-математических наук: **В. В. Меньшенин**
Доктор физико-математических наук: **В. Ю. Ирхин**

ISBN 978-5-8295-0882-1

© ИФМ УрО РАН, 2023 г.
© И. Г. Кулеев, И. И. Кулеев, 2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Фокусировка фононов в металлических и диэлектрических кристаллах кубической симметрии.	13
1.1. Динамические характеристики фононов в металлических и диэлектрических кристаллах в модели анизотропного континуума.	15
1.2. Групповая скорость и особенности распространения фононов в металлических и диэлектрических кристаллах кубической симметрии	31
1.3. Влияние фокусировки на плотность фононных состояний в щелочных металлах	38
1.4. Коэффициент усиления потока фононов в металлических и диэлектрических кристаллах кубической симметрии.	45
1.4.2. Анализ угловых зависимостей коэффициента усиления.	48
1.5. Заключение	59
Глава 2. Фокусировка фононов и электронный транспорт в монокристаллах калия.	61
2.1. Электрон-фононная релаксация в упруго анизотропных металлах.	64
2.2. Влияние фокусировки фононов на решеточную теплопроводность и термоэдс увлечения в кристаллах калия.	68
2.3. Роль сдвиговых волн в термоэдс увлечения и решеточной теплопроводности объёмных кристаллов калия.	74
2.4. Влияние упругой анизотропии на электросопротивление объёмных кристаллов калия.	79
2.4.1. Влияние анизотропии упругой энергии на электрон-фононную релаксацию и электросопротивления кристаллов калия.	80
2.5. Влияние фокусировки на взаимное увлечение электронов и фононов и электросопротивление кристаллов калия.	88
2.5.1. Влияние фокусировки фононов на релаксацию и обмен импульса между электронным и тремя фононными потоками.	89
2.5.2. Фокусировка фононов и электросопротивление кристаллов калия.	94
2.5. Заключение	101

Глава 3. Влияние фокусировки фононов и сдвиговых волн на термоэдс увлечения в монокристаллических наноструктурах калия. 104

3.1.2. Влияние фокусировки фононов на анизотропию термоэдс увлечения в нанопроводах на основе кристаллов калия.	106
3.1.2 Анизотропии термоэдс увлечения нанопроводов в условиях конкуренции граничного и объёмных механизмов релаксации фононов.	111
3.2 Новый эффект в термоэдс увлечения в монокристаллических нанопластинах калия при низких температурах	115
3.2.1. Анизотропия термоэдс увлечения нанопластин калия при низких температурах	115
3.2.2 Анизотропия термоэдс увлечения нанопластин в условиях конкуренции граничного и объёмных механизмов релаксации.	119
3.2.3 Новый эффект в термоэдс увлечения нанопластин калия.	122
3.3. Фокусировка фононов и анизотропия термоэдс увлечения в нанопленках калия при низких температурах.	125
3.3.1 Фокусировка фононов и термоэдс увлечения в квадратных пленках калия с различной ориентацией плоскостей.	126
3.3.2 Анизотропия термоэдс увлечения квадратных пленок в условиях конкуренции граничного и объёмных механизмов релаксации.	133
3.3.3 Анизотропия термоэдс увлечения в длинных пленках калия.	135
3.4. Заключение	142

Глава 4. Роль сдвиговых волн в электрон-фононной релаксации и электросопротивлении благородных металлов 143

4.1. Динамические характеристики и фокусировка фононов в благородных металлах.	146
4.2. Электрон-фононная релаксация в благородных металлах	151
4.3. Поверхность Ферми в благородных металлах.	155
4.4. Влияние анизотропии упругой энергии на электросопротивление благородных металлов.	157
4.5. Обсуждение результатов	159
4.6. Заключение	166

5. Перспективы дальнейших исследований.	167
Приложение 1 скорости релаксации фононов при диффузном рассеянии на границах монокристаллических образцов конечной длины.	171
П.1.1. Релаксация фононов на границах образцов бесконечной длины с круглым, квадратным и прямоугольным сечениями	171
П.1.2. Скорости релаксация фононов при диффузном рассеянии на границах образцов конечной длины с круглым, квадратным и прямоугольным сечениями.	178
П.1.3. Анизотропия длин свободного пробега фононов в образцах кремния с круглым и квадратным сечениями при низких температурах.	184
Список литературы.	192